

平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代パワーデバイス電極材料の開発」

成 果 報 告 書

平成 23 年 9 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人ふくい産業支援センター

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
(1) 研究組織・管理体制	
(2) 管理員及び研究員	
(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	
(4) その他	
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第 2 章 本論	11
2-1 高機能プリンタヘッドの開発	11
2-2 半導体ウエハ表面改質の研究	14
2-3 レーザー照射による金属電極形成の開発	17
2-4 接合用無電解めっき皮膜の検討	20
第 3 章 全体総括	24

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

メモリーやロジック LSI などの半導体デバイスは生産技術を生かして 1980 年代半ばには半導体市場シェア 7 割を占め日本が市場優位性を得ていたが、現在は技術の普遍化によりシェア 2 割を割り込み中国、韓国、台湾などのアジア諸国の後塵を拝している。現在、半導体において日本が比較的優位を保っているのは電池などの蓄電デバイスや制御系との総合的なパワーデバイス分野であり、これらを維持、発展することが日本の産業界にとって非常に重要である。

従来技術を用いた半導体材料作製プロセスでは、酸化膜を形成した高純度シリコンウエハ上に真空スパッタ法とフォトリソグラフィ法を用いて電極形成を行っている。真空スパッタ法は、装置コスト、消費エネルギー、成膜時間などに課題を抱えている。また、フォトリソグラフィ法は、レジスト塗布、露光、現像と多段階の工程が必要で、レジスト、現像液、剥離液など使用薬品量が多い。また、パターン毎にフォトマスクを用意する必要性があり、パターン変更への迅速な対応が困難等の課題がある。従来技術を用いたプロセスでは、国際競争に勝ち残るためには克服せざるを得ない課題がある。インクジェット法はウエハ上に直接パターンの形成が可能であるため、これらの課題の克服が可能であるが、高精度なパターン形成が困難である。本開発ではレーザー照射を併用しインクジェット法によりウエハ上に高精度なパターンを直接形成可能な新技術を開発する。この新技術では、従来技術と比べ工程数 1/4 以下、装置費用 1/5 以下、処理時間 1/3 以下、処理コスト 1/3 以下に削減することが期待される。

次世代パワーデバイス電極材料の開発では、清川メッキ工業株式会社が有する精密電鍍めっき技術及び接合用無電解めっき技術を中心に、国立大学法人福井大学が有するフッ素ガスによるシリコンウエハ表面のフッ素化処理技術、独立行政法人産業技術総合研究所が有するレーザー援用インクジェット技術を用いてパワーデバイス電極材料の開発を進める。

①-1 高機能プリンタヘッドの開発

【清川メッキ工業株式会社】

清川メッキ工業株式会社が有する電鍍めっき技術を用い、高機能プリンタヘッドの作製を行う。また、金属粒子インクを吐出時の摩擦による劣化が想定されるため、劣化を抑制可能な高硬度膜の検討を行いプリンタヘッド部の高耐久性を狙う。

①-1-1 精密電鍍による高精度プリンタヘッドの作製

フォトリソグラフィ条件（レジストの選定、レジスト塗布条件、露光条件、現像条件）の検討を行い、高精度プリンタヘッドを作製する。

- ・ 開口径 $\phi 55 \mu\text{m} \pm 5\%$ 以内、 f テーパー角 85° 以下のプリンタヘッドの作製
- ・ 開口径 $\phi 20 \mu\text{m} \pm 5\%$ 以内、 f テーパー角 85° 以下のプリンタヘッドの作製

①-1-2 皮膜硬度による耐久性向上

Ni-Co などの Ni 合金膜、TiN、TiAl、TiAlV などのイオンプレーティング膜の検討を行い、

高耐久性皮膜の開発を行う。

- ・ ビッカース硬度 Hv1000 以上の高硬度めっき皮膜の開発
- ・ 50 時間連続塗布した後、プリンタヘッド形状に劣化なきこと

①-2 半導体ウエハ表面改質の研究

【清川メッキ工業株式会社、国立大学法人福井大学】

国立大学法人福井大学が有するフッ素ガスを用いたフッ素化技術により、シリコンウエハ上にナノレベルのアンカー効果発現させ、化学的に電極との密着性を確保することを狙う。

①-2-1 シリコンウエハ上と電極間の密着性の確認

フッ素ガス修飾を行ったウエハ上に作製した $300\mu\text{m}$ テストパターンでの評価

- ・ シェア強度 0.5Kgf 以上

①-2-2 電極密着性 信頼性評価

- ・ 熱衝撃試験 100°C : 5 分、 0°C : 5 分、10 サイクル劣化なきこと
- ・ 温度サイクル試験 -20°C : 60 分 ~ 125°C : 60 分、10 サイクル劣化なきこと

①-3 レーザー援用による金属電極形成方法の開発

【清川メッキ工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所】

独立法人産業技術総合研究所が有するレーザー援用インクジェット技術により、厚膜で低抵抗な金属電極をウエハ上に形成させる。

①-3-1 金属電極の形成

1-1 で作製した高機能プリンタヘッドを用いて、ウエハ上に金属電極を形成させる。

- ・ 開口径 $\phi 55\mu\text{m}$ プリンタヘッド : 線幅 $55\mu\text{m} \pm 10\%$ 以内、速度 $10\text{mm}/\text{秒}$ で描画
- ・ 開口径 $\phi 20\mu\text{m}$ プリンタヘッド : 線幅 $20\mu\text{m} \pm 10\%$ 以内、速度 $10\text{mm}/\text{秒}$ で描画

①-3-2 金属電極の低抵抗化

電極厚みの調整により電極の低抵抗化を狙う。

- ・ 配線抵抗 $6\Omega/\text{cm}$ 以下

①-4 接合用無電解めっき皮膜の検討

【清川メッキ工業株式会社】

清川メッキ工業株式会社が有する無電解めっきを用いた接合用めっき技術を用い、インクジェット法で形成された金属電極上への接合用めっき皮膜の開発を行う。

①-4-1 低応力めっき皮膜の開発

- ・ 無電解 Ni めっき皮膜 $10\ \mu\text{m}$ において、皮膜内部応力 $5.0\ \text{Kgf}/\text{mm}^2$ 以内

①-4-2 電極半田濡れ 信頼性評価

□ $300\ \mu\text{m}$ テストパターンにおいて電極半田濡れ性試験を行う。

- ・ 半田耐熱試験 $260^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ 、 $10\ \text{秒}\pm 1\ \text{秒}$ 、劣化なきこと
- ・ 半田濡れ試験 $235^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ 、 $5\ \text{秒}\pm 0.5\ \text{秒}$ 、半田弾きなきこと

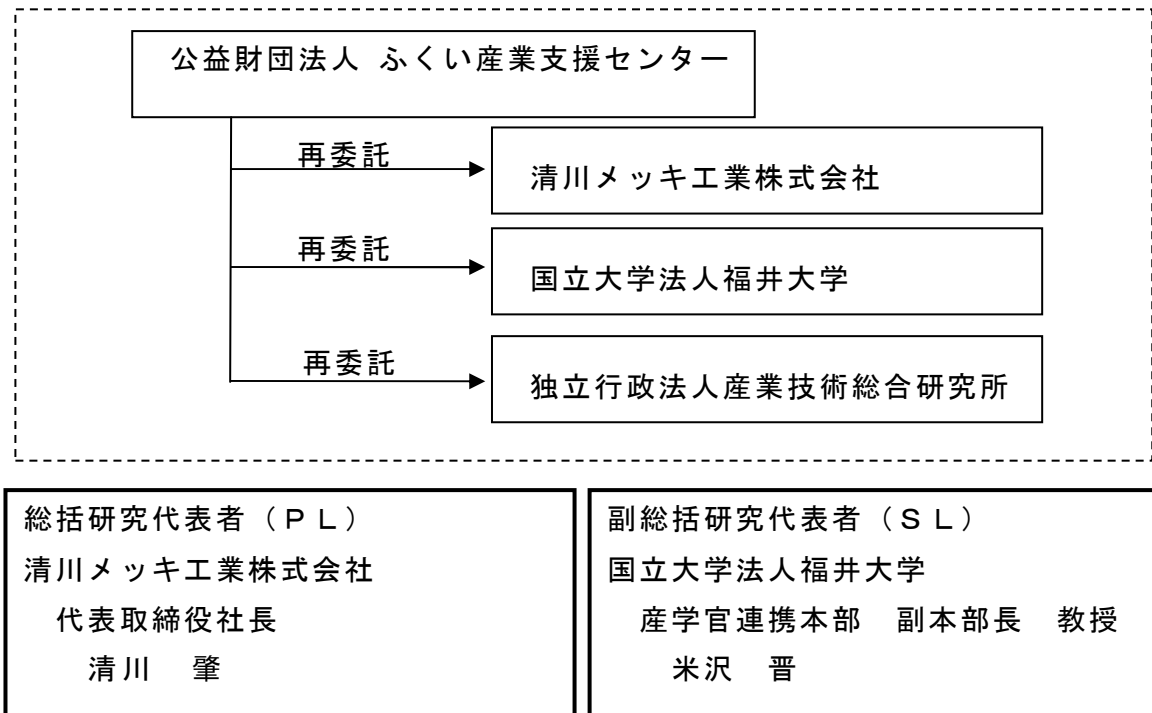
② プロジェクトの管理・運営

【公益財団法人ふくい産業支援センター】

再委託契約の締結業務、研究推進委員会の準備、開催、近畿経済産業局ならびに再委託先との連絡調整、委託費の管理・運営執行を行う。

1-2 研究体制

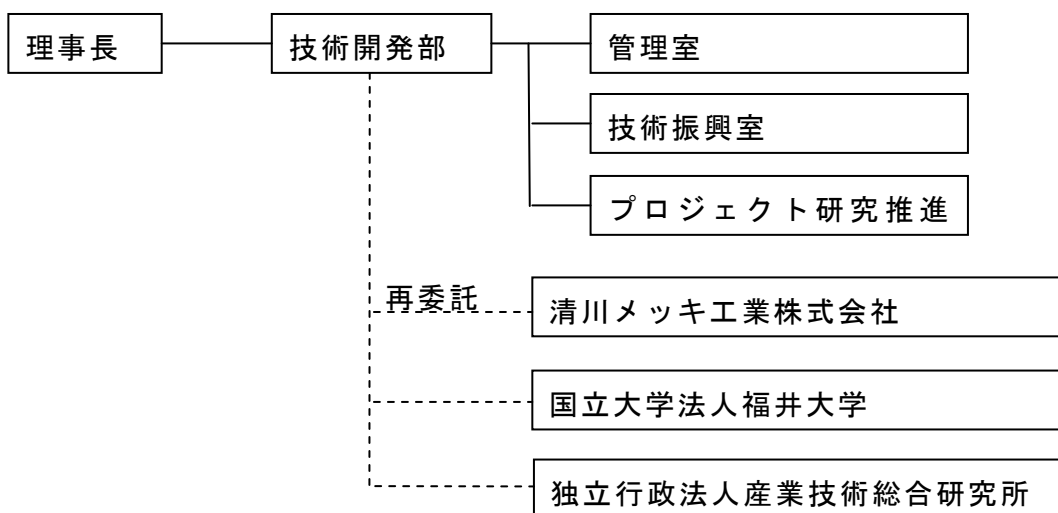
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

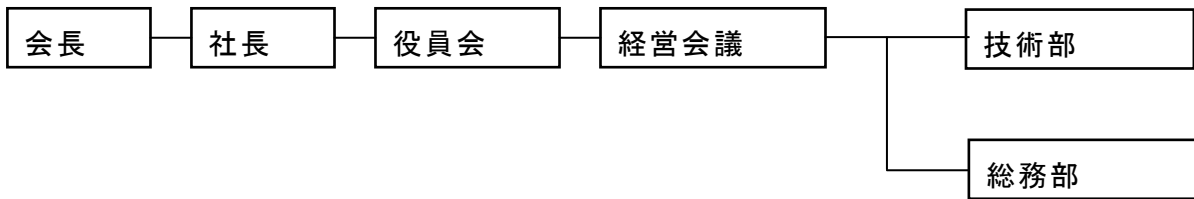
①事業管理者

公益財団法人ふうい産業支援センター

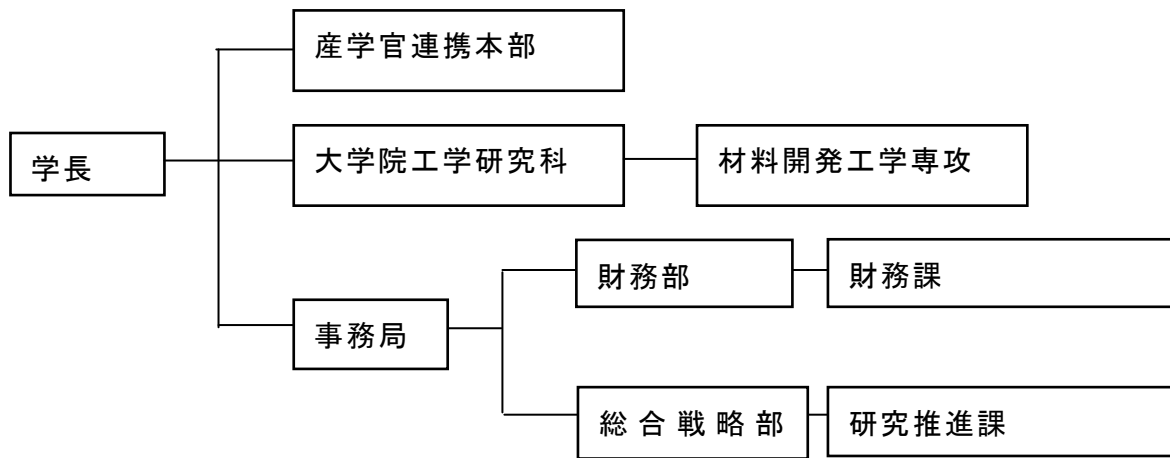


②再委託先

清川メッキ工業株式会社



国立大学法人福井大学



独立行政法人産業技術総合研究所



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】公益財団法人ふくい産業支援センター

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岩佐 進一	技術開発部プロジェクト研究推進室 室長	②
雲竜 常宗	技術開発部プロジェクト研究推進室 研究員	②
真杉 弘祐	技術開発部管理室 主事	②

【再委託先】

②研究員

清川メッキ工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
清川 肇	代表取締役社長	①-1、①-2、①-3、 ①-4
山崎 浩一	技術部 部長代理	①-1、①-2、①-3、 ①-4
本多 正二郎	技術部 課長	①-1、①-2、①-3、 ①-4
西出 純一郎	技術部 主任	①-1、①-2、①-3、 ①-4
大平 信孝	技術部 研究員	①-1、①-2、①-3、 ①-4
伊部 敬史	技術部 研究員	①-1、①-2、①-3、 ①-4

国立大学法人福井大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
米沢 晋	産学官連携本部・副本部長・教授	①-2
金 在虎	大学院工学研究科材料開発工学専攻・ 助教	①-2

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
明渡 純	集積加工研究グループ 主幹研究員	①-3
廣瀬 伸吾	集積加工研究グループ 主任研究員	①-3
遠藤 聡人	集積加工研究グループ 研究員	①-3
津田 弘樹	集積加工研究グループ 研究員	①-3

(3) 経理担当者及び業務管理社の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人ふくい産業支援センター

(経理担当者) 技術開発部管理室 主事

真杉 弘祐

(業務管理者) 技術開発部プロジェクト研究推進室 室長

岩佐 進一

(再委託先)

清川メッキ工業株式会社

(経理担当者) 常務取締役

清川 忠幸

(業務管理者) 代表取締役社長

清川 肇

国立大学法人福井大学

(経理担当者) 財務部財務課長

高島 純一

(業務管理者) 産学連携本部副本部長

米沢 晋

独立行政法人産業技術総合研究所

(経理担当者) 総務本部 財務部 経理室 室長

井佐 好雄

(業務管理者) 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ長 明渡 純

(4) その他

他からの指導・協力者名および指導・協力事項

①アドバイザー及び指導・協力事項

アドバイザー	所属・役職	指導・協力事項
本間 英夫	学校法人 関東学院大学 工学部 教授	めっき技術全般について アドバイスを頂く。
宮崎 孝司	福井県工業技術センター 所長	技術全般について アドバイスを頂く。

②研究推進委員会

委員氏名	所属・役職	備考
清川 肇	清川メッキ工業株式会社 代表取締役社長	総括研究代表者 (PL)
米沢 晋	国立大学法人福井大学 産官学連携本部 副本部長 教授	副総括研究代表者 (SL)
明渡 純	独立行政法人 産業技術総合研究所 主幹研究員	

1-3 研究成果

①-1 高機能プリンタヘッドの開発

【清川メッキ工業株式会社】

8インチウエハ上にフォトリソ技術を用いて作製した開口径55 μ m及び20 μ mのNi電鍍製インクジェットヘッドを作製し、その上に金属ナノ粒子を吐出させる際の磨耗を防ぐため、イオンプレーティング法によりTiCN膜を形成した。磨耗性試験として、50時間の吐出試験を行い耐久性の確認を行った。

サブテーマ	確認項目	技術的目標値	達成	達成事項/課題事項
①-1-1 精密電鍍による高精度プリンタヘッドの作成	寸法精度(1)	プリンタヘッド寸法 開口径 ϕ 55 μ m \pm 1 μ m以内 テーパ角85°以下であること	達成	開口径55.8 μ m(+1.5%)、角度53.5°
	寸法精度(2)	プリンタヘッド寸法 開口径 ϕ 20 μ m \pm 1 μ m以内 テーパ角85°以下であること	達成	開口径20.8 μ m(+4.0%)、角度52.5°
①-1-2 皮膜硬度による耐久性向上	高硬度化	めっき皮膜硬度 ピッカース硬度H1000以上あること	達成	ピッカース硬度H2218
	耐久性	50時間連続塗布 プリンタヘッド形状変化なきこと	達成	開口径、角度に変化無し

①-2 半導体ウエハ表面改質の研究

【清川メッキ工業株式会社、国立大学法人福井大学】

フッ素ガスを用いた表面改質を行ったシリコンウエハを用いて、レーザー援用インクジェット法による金属配線の描画と、その上に低応力無電解Ni/Auめっき処理を行った金属配線の密着性について、シェア試験を行い確認した。信頼性評価として、熱衝撃試験及び温度サイクル試験を行い金属電極の評価を行った。

サブテーマ	確認項目	技術的目標値	達成	達成事項/課題事項
①-2-1 シリコンウエハと電極間の密着性の確保	密着性	\square 300 μ mパターン シェア強度0.5kgf/cm以上あること	達成	平均シェア強度0.596Kgf
①-2-2 電極密着性 信頼性評価	評価(1)	\square 300 μ mテストパターン 熱衝撃試験 100°C:5分、0°C:5分、10サイクル 劣化なきこと	未達成	平均シェア強度0.330Kgf 試験前に比べ強度45%劣化
	評価(2)	\square 300 μ mテストパターン 温度サイクル試験 -20°C:60分~125°C:60分、10サイクル劣化なきこと	未達成	平均シェア強度0.393Kgf 試験前に比べ強度35%劣化

①-3 金属電極の形成

【清川メッキ工業株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所】

インクジェット法により金属ナノ粒子を用いた金属電極を形成する際、レーザーを同時に照射することで乾燥を迅速化し、配線描画の精度を向上させた。また、金属電極の低抵抗化を目指した描画方法を検討した。

サブテーマ		確認項目	技術的目標値	達成	達成事項/課題事項
①-3-1	金属電極の形成	電極形成速度(1)	プリンタヘッド寸法開口径 $\phi 55\mu\text{m}$ 線幅 $55\mu\text{m}\pm 10\%$ 以内、速度 10mm/秒 で描画可能なこと	一部達成	線幅 $55\mu\text{m}\pm 10\%$ 以内 達成 線幅速度 3mm/秒
		電極形成速度(2)	プリンタヘッド寸法開口径 $\phi 20\mu\text{m}$ 線幅 $20\mu\text{m}\pm 10\%$ 以内、速度 10mm/秒 で描画可能なこと	一部達成	線幅 $20\mu\text{m}\pm 10\%$ 以内 達成 線幅速度 3mm/秒
①-3-2	電極の低抵抗化	電極抵抗評価	配線抵抗 $6\Omega/\text{cm}$ 以下であること	達成	配線抵抗 $5.48\Omega/\text{cm}$

①-4 接合用無電解めっき皮膜の検討

【清川メッキ工業株式会社】

半田を用いた半導体素子との接合を行う際、無電解めっき皮膜が持つ内部応力の影響を低減するため、低応力の無電解Niめっき皮膜の検討を行った。また、検討した低応力無電解Niめっき皮膜の信頼性を評価するため、半田耐熱試験及び半田濡れ試験を行い信頼性評価を行った。

サブテーマ		確認項目	技術的目標値	達成	達成事項/課題事項
①-4-1	低応力めっき皮膜の開発	皮膜応力	Niめっき皮膜 $10\mu\text{m}$ において 皮膜内部応力: $5.0\text{kgf}/\text{mm}^2$ 以内	達成	皮膜内部応力 $5.0\text{kgf}/\text{mm}^2$ 以内
①-4-2	電極半田濡れ 信頼性評価	信頼性評価(1)	$\square 300\mu\text{m}$ テストパターン 半田耐熱試験(ロジン系フラックス) $260^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ 、 $10\text{秒}\pm 1\text{秒}$ 、劣化なきこと	達成	半田耐熱劣化無し
		信頼性評価(2)	$\square 300\mu\text{m}$ テストパターン 半田濡れ試験(ロジン系フラックス) $235^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ 、 $5\text{秒}\pm 0.5\text{秒}$ 、半田弾きなきこと	達成	半田弾き無し

② プロジェクトの管理・運営

【公益財団法人ふくい産業支援センター】

再委託先の締結業務、研究推進委員会の準備・開催、近畿経済産業局ならびに再委託先との連絡調整、委託費の管理・運営を行った。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

公益財団法人ふくい産業支援センター

〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町61字北稻田10

TEL. 0776-55-1555 FAX. 0776-55-1554

連絡担当者 技術開発部 プロジェクト研究推進室 室長 上山 明彦

E-mail: a.ueyama@fisc.jp

第2章 本論

2-1 高機能プリンタヘッドの開発

精密電鍍めっき技術を用い、高機能プリンタヘッドの作製を行った。また、金属粒子インクを吐出時の摩擦による劣化が想定されるため、劣化を制御可能な高硬度膜の検討を行いプリンタヘッド部の高耐久性を狙った。

2-1-1 精密電鍍による高精度プリンタヘッドの開発

フォトリソグラフィ条件（レジストの選定、レジスト塗布条件、露光条件、現像条件）及び作製パターンの検討を行い、高機構プリンタヘッドの開発を行った。

(1) 検討内容

- ・電鍍母材 ϕ 8 インチ シリコンウエハ
- ・電鍍皮膜 Ni
- ・めっき膜厚 30 μ m

レジストパターン幅を調整し、開口径が ϕ 55 μ m \pm 5% 以内及び ϕ 20 μ m \pm 5% 以内になるようなプリンタヘッドを作製した。

(2) 実験結果

開口径 55 μ m 狙いパターン

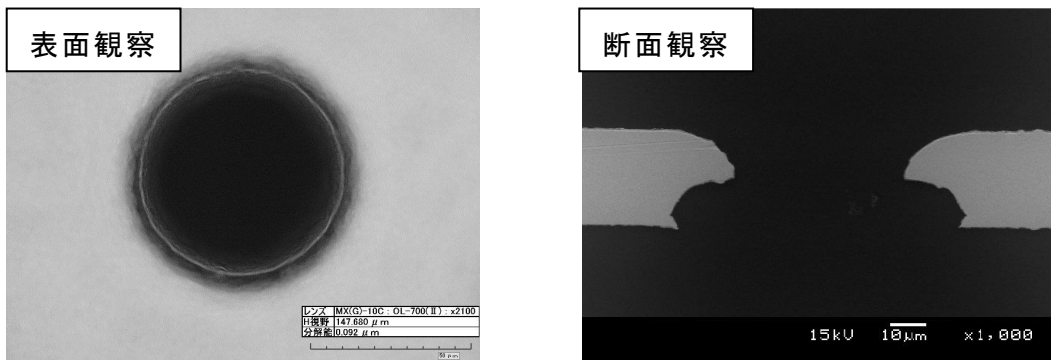


図 2-1-1-A 開口径 55 μ m インクジェットヘッド表面及び断面観察

開口径 20 μ m 狙いパターン

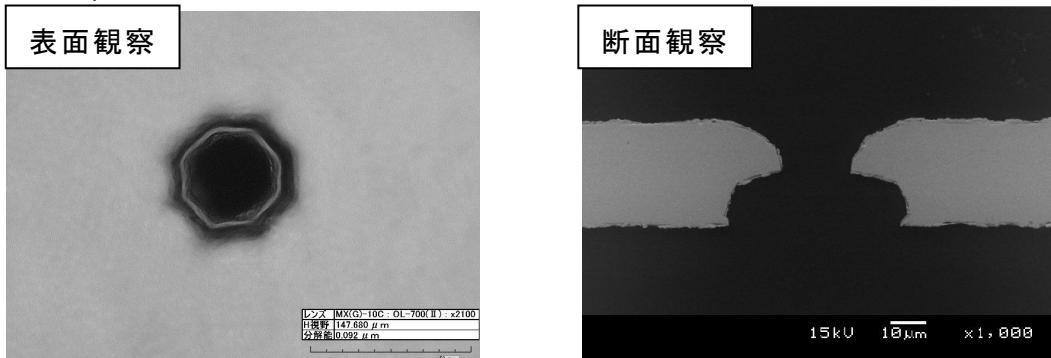


図 2-1-1-B 開口径 20 μ m インクジェットヘッド表面及び断面観察

表 2-1-1-a 開口径 55 μm インクジェットヘッド開口径及びテーパー角

55 μm 狙い		四角パターン	丸パターン	八角形パターン	
開口径		μm	56.3	55.8	54.5
角度	左部	。	65	54	63
	右部		58	53	65

表 2-1-1-b 開口径 20 μm インクジェットヘッド開口径及びテーパー角

20 μm 狙い		四角パターン	丸パターン	八角形パターン	
開口径		μm	19.8	20.8	20.3
角度	左部	。	64	50	52
	右部		67	55	67

精密電鍍処理により作製したインクジェットヘッドを、プリンターノズル確認装置を用いて精度を観察した結果、

開口径 55 μm 狙い品 平均開口径 55.5 μm 、角度 59.7°

開口径 20 μm 狙い品 平均開口径 20.4 μm 、角度 59.2°

を示しており、目標を満たす結果である。今回得られた結果をもとに、レーザー援用インクジェット法に適したインクジェットヘッド形状を設計及び作製を今後行っていく。

2-1-2 皮膜硬度による耐久性向上

金属粒子インクによる磨耗を抑制させるため、電鍍皮膜上にイオンプレーティング膜を用いたビッカース硬度 Hv1000 以上の高硬度めっき皮膜を施し、インクジェットノズル部の耐久性試験を行った。

(1) 検討内容 (イオンプレーティング)

- ・母材 2-1-1 で作製した Ni 電鍍
- ・イオンプレーティング皮膜 TiCN
- ・イオンプレーティング膜厚 0.2 μm 狙い

(2) 実験結果

(皮膜硬度)

表 2-1-2-a 硬度測定結果

		TiCN膜+Ni電鍍	Ni電鍍膜
押し込み硬さ	N/mm ²	25190	5081
マルテンス硬さ	HM	13860	4187
ビッカース硬度	Hv	2218	496

薄膜の硬度測定のため、ビッカース硬度計での測定は困難なため、ビッカース圧子に超微小荷重を連続的に押し込み、荷重-変位 (押し込み深さ) 曲線から硬さを求めるマルテンス硬さを求め、換算式によりビッカース硬度を求めた。

TiCNイオンプレーティング膜を形成したインクジェットヘッドの硬度はビッカース硬度Hv2218とNi電鍍皮膜の約4倍硬い皮膜である。

目標とするビッカース硬度Hv1000以上の高硬度膜が得られた。

(耐久試験)

使用装置 マイクロジェット製
吐出時間 50時間

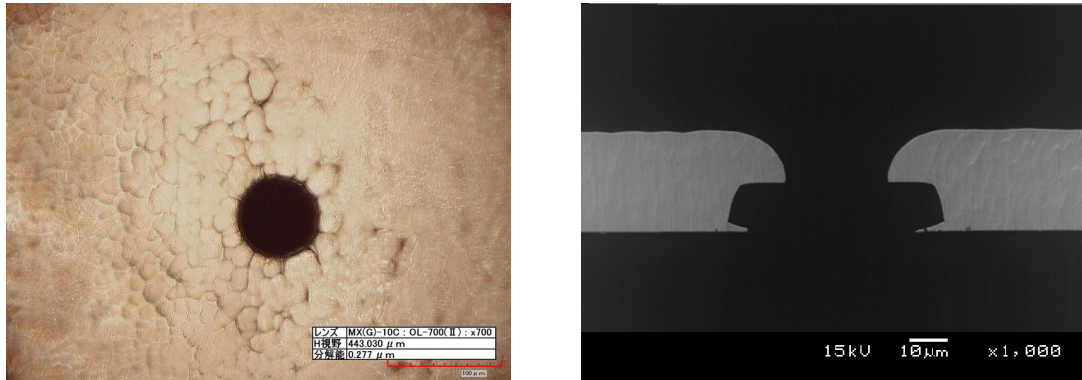


図 2-1-2-A 耐久試験前

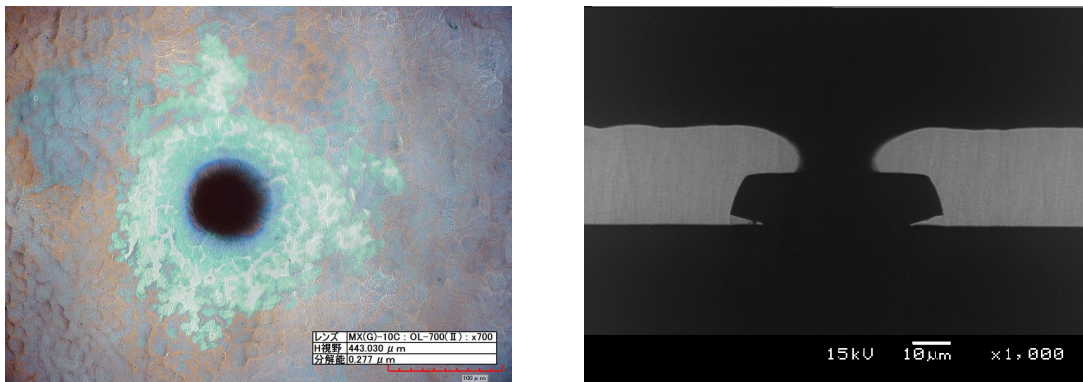


図 2-1-2-B 耐久試験後

※ 断面分析は同一試験片内の別ポイントを分析しております。

表 2-1-2-b 耐久試験前後インクジェットヘッド精度

		耐久試験前	耐久試験後
開口径		19.5	20.7
角度	左部	60	62
	右部	70	67

インクジェット配線を行う際、使用するAgナノ粒子インクを用いたインクジェットヘッドの耐久試験の結果、吐出時間50時間においてヘッド部の形状変化、開口径及び角度に大きな変化は確認されていない。本実験では、ビッカース硬度Hv2200の高硬度膜処理を行っているが、今後は電鍍めっき皮膜のみの耐久性や長時間の連続使用における耐久性の確認を行っていく必要があると考えている。

2-2 半導体ウエハ表面改質の研究

フッ素化の条件検討を実施中。初サンプルを作製、インクジェットによる描画試験を行った。

2-2-1 ウエハと電極間の密着性確保

(1) フッ素化処理条件の検討（フッ素量、反応圧力、反応時間）

(半導体表面改質方法について)

半導体ウエハと電極の密着性確保のため、従来技術では真空プロセスによる金属膜スパッタ蒸着法を用いることが一般的である。これはスパッタ時の金属種が持つ運動エネルギーが基板に衝突するさいに密着性を付与するように働くことから、これをアンカーとして電極を形成することが望ましいとされている。しかしながら、スパッタプロセスには装置が高額であることや何よりも枚葉式であることによる生産効率が現状ではこれ以上に最適化することが困難な状況にあるなどの問題点がある。ここではスパッタプロセスを使わずに半導体ウエハ上にめっき膜を形成する際に、その密着性を確保するために必要な前処理プロセスの開発をフッ素ガスを用いた化学的表面改質プロセスを利用して行った。

(2) 検討結果

(シリコンウエハの表面フッ素化による表面形態の変化)

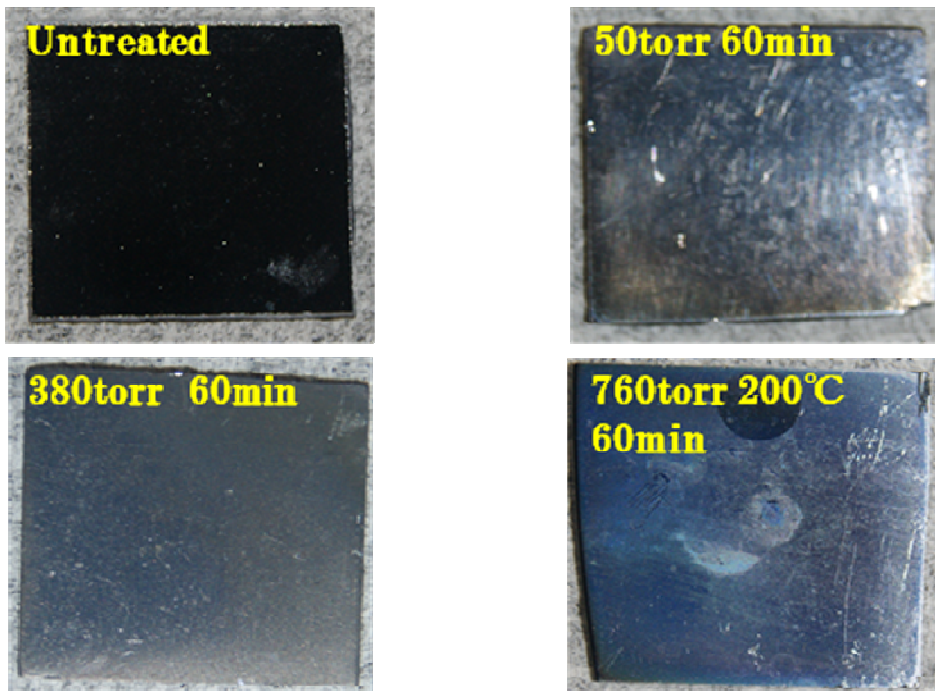


図 2-2-1-A フッ素ガスにより表面改質（50 Torr、RT、1hr）した Si ウエハ一表面の光学顕微鏡写真

図 2-2-1-A に、フッ素ガスにより表面改質した Si ウエハ一表面の光学顕微鏡写真を示した。光学顕微鏡写真からわかるように、フッ素ガス圧 50 Torr、RT、1hr の条件下では Si ウエハはマクロなスケールでは形態に変化はない。380 Torr 程度以上のフッ素ガス圧力下での反応では表面の変色がみられ、反射率の極端な低下とともに、微細な凹凸構造の形成が進行しており、こうした形態の変化は後に述べる表面への

配線パターン形成とその密着性向上に貢献すると考えられる。表面の結合状態の影響は現状でもはっきりと区別して議論することができないが、トータルとしてめっき皮膜の密着性向上に貢献していると考えられる。もちろん、シードスパッタ層作製を不要にする湿式めっきプロセスの確立に向けて、最大の課題であるめっき皮膜（配線や電極）の密着性改善を今後も継続して進める必要があると考えられる。

（めっき膜密着性の評価）

シリコンウエハ上に各種条件でフッ素化処理を行ったサンプルを用いて、インクジェット法で形成したA g電極上に無電解ニッケル（10 μm）／金（0.05 μm）処理を行いシリコンウエハとA g電極の密着性の確認を行った。

今回の検討では、フッ素化条件380 torr、60 min.を除いて、無電解ニッケルめっき処理中にA g電極が剥れることが確認されており、十分な密着性が得られていない結果となっており、今回の評価は、めっき中に剥れが無かった380 torr、60 min.条件品を用いてシェア強度測定を行った。

表 2-2-1-a シェア強度測定結果

シェア強度(Kgf)	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	Ave.	Std.
未処理	めっき中に皮膜剥れ発生						
1 torr 10min	めっき中に皮膜剥れ発生						
5 torr 10min	めっき中に皮膜剥れ発生						
380 torr 60min.	0.776	0.628	0.338	0.681	0.557	0.596	0.165

シェア試験は、最大荷重5 K g fのロードセルを用い、テストスピード50 mm／秒で測定を行った。5箇所を測定した結果、1つのポイントで目標とする0.5 K g fを下回る結果となっているが、その他の測定点は目標値を満たす結果となっている。A g電極との密着性を確保するためには物理アンカーが必要であると考えられる。物理アンカーの有効性を確認するため、380 torrサンプルと同程度の表面粗さ0.3 μmを研磨により形成したサンプルを作製し同様な検討を行ったが、めっき液中で電極が剥れてしまうことより、フッ素化処理を行うことで、物理的アンカー以外にもシリコン基板表面の濡れ性など化学的な影響を受けていることが考えられる。

2-2-2 電極密着性 信頼性評価

フッ素化処理シリコン上に無電解ニッケル／金めっきを行い密着性が得られた条件のサンプルを用いて、温度影響による電極の信頼性を評価するため、熱衝撃試験及び温度サイクル試験を行い密着性の確認を行った。

(熱衝撃試験)

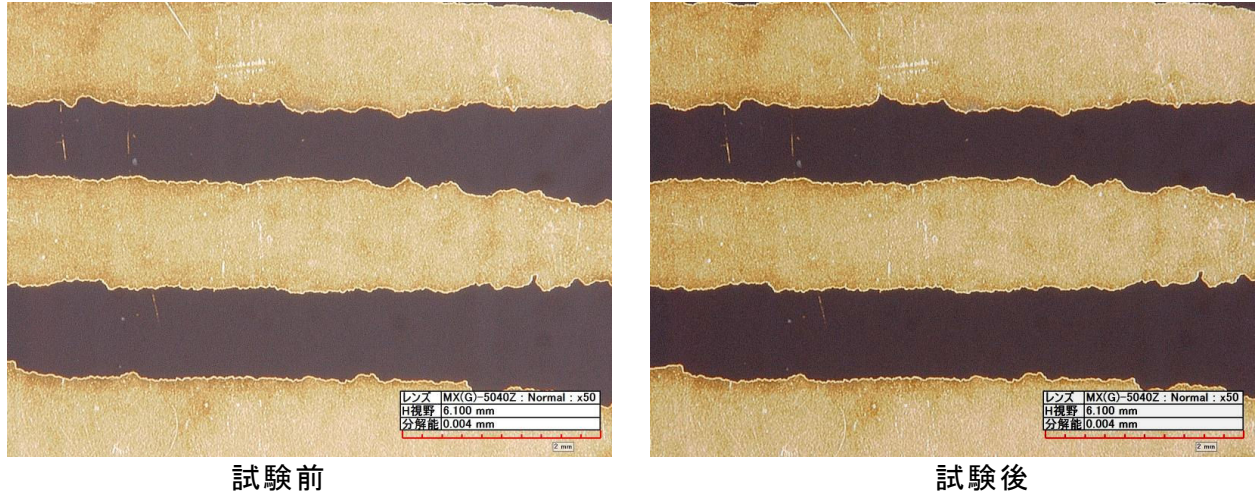


図 2-2-2-A 熱衝撃試験前後 外観

(温度サイクル試験)



図 2-2-2-B 温度サイクル試験前後 外観

表 2-2-2-a 温度試験後 シェア測定結果

シェア強度(Kgf)	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	Ave.	Std.
熱衝撃試験	0.392	0.297	0.314	0.471	0.178	0.330	0.110
温度サイクル試験	0.490	0.287	0.368	0.442	0.376	0.393	0.077

各温度試験による外観の変化は確認されていない。しかし、シェア試験結果より温度変化により密着性に乏しくなる傾向が確認されている。温度が変化することにより、シリコンウエハ表面の収縮、膨張などにより Ag 配線の強度が損なわれた可能性が考えられ、シリコン界面の分析を行う必要がある。

2-3 レーザー照射による金属電極形成の開発

2-3-1 インクジェット法による金属電極の形成

①従来の金属電極形成技術の研究開発と課題

従来の配線・金属電極形成技術との比較において、インクジェット法はいくつか課題が挙げられていた。以下に課題を列記する。

- ・配線工程において、他の技術よりインクジェットはスループットが大きく遅い。
- ・配線幅が30 μm 以下の描画が出来ない。さらに膜厚が薄く、低抵抗の配線を得られない。得るためには、重ね塗り等が必要。

などがあげられる。

②レーザー援用インクジェット法

インクジェット法による高精度なパターンニングは、液滴インクの濡れ拡がりにより、インクジェットのパターンニング精度を低くすることから、解決するのが困難な課題であった。このことから、本研究では、エネルギーを援用することにより、液滴インクの濡れ拡がりを制御することを考えた。

③インクジェット法を用いた金属電極の技術課題

1) 開発目標と技術的開発要素

本開発において、表2-3-1-Aにインクジェット法による金属電極形成方法の開発目標を記載する。金属電極の形成において、配線幅は55 μm 、20 μm の2パターンとし、電極形成速度は、10mm/secとした。また、描画した電極の低抵抗化として、配線1cm辺りの抵抗値を6 Ω 以下と設定した。

表 2-3-1-a インクジェット法による金属電極形成方法の開発目標

開発目標		
金属電極の形成	配線幅1	55 μm ±10%以内
	配線幅2	20 μm ±10%以内
	電極形成速度	10mm/sec以上
電極の低抵抗化	配線抵抗	6 Ω /cm以下
技術的開発要件		
配線幅	目標とする配線幅のインクジェット描画	
スループット	安定した高速インク吐出	
低抵抗配線	Si基板に適合したレーザーの選択(波長、パワー)	

2) 実験

i) 金属電極の形成

○金属電極の形成 配線幅1 (55 μm ±10%以内)

表 2-3-1-b インクジェット法による金属電極の描画条件

描画条件	描画条件
ノズル口径 : 35 μm	ノズル口径 : 35 μm
吐出周波数 : 200~300Hz	吐出周波数 : 200~300Hz
使用インク : ULVAC Agインク	使用インク : ULVAC Agインク
走査速度 : 3 mm/sec	走査速度 : 3 mm/sec
基板 : ガラス/Si	基板 : ガラス/Si
使用レーザー : CO ₂ /YAG	使用レーザー : CO ₂ /YAG

実験に際して金属電極を描画する条件を表2-3-1-Bに示す。

○実験結果

オリフィス径 $50\mu\text{m}$ のインクジェットヘッドを用いて、インク液滴を吐出し、レーザー援用インクジェット技術を用いて、シリコン基板上に配線を描画した。

- ・レーザー援用により、ガラス、Si基板ともに、オリフィス径程度の配線幅で描画が可能。という結果となった。
- ・配線幅の誤差は、インクジェットのドットパターンの影響から、目標値に対して $\pm 5\%$ とバラつきが大きい。

次に、描画した配線にNi/Auメッキを行った。

配線描画の結果、レーザー援用無しの配線は、描画側面の薄い部分は、メッキ時に溶解し、比較的配線の中央部の厚い部分に密着し、アスペクト比が0.8となった。また、配線幅の誤差は、メッキを行うことにより、 $50\mu\text{m}$ 配線時の $\pm 1\%$ 程度に抑制することが可能となった。

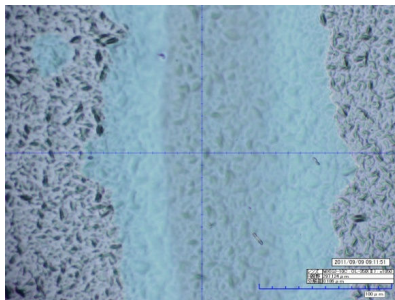
○金属電極の形成 配線幅 $2(20\text{mm} \pm 10\%$ 以内)

実験に際して金属電極を描画する条件を表2-3-1-cに示す。

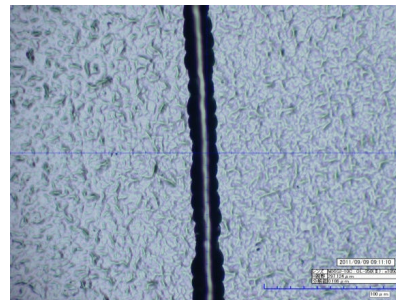
表 2-3-1-c インクジェット法による金属電極の描画条件

描画条件	描画条件
IPヘッド : マイクロジェット製	IPヘッド : マイクロジェット製
ノズル口径 : $20\mu\text{m}$	ノズル口径 : $20\mu\text{m}$
吐出周波数 : 300Hz	吐出周波数 : 300Hz
使用インク : ULVAC Agインク	使用インク : ULVAC Agインク
走査速度 : 4 mm/sec	走査速度 : 4 mm/sec
基板 : Si	基板 : Si
使用レーザー : YAG	使用レーザー : YAG

○実験結果



レーザー援用無し



レーザー援用有り

図 2-3-1-A 粗面 Si 基板上の配線描画

配線描画の結果、レーザー援用無しの配線は、基板表面が粗面のため、毛細管現象で配線幅が広がり、 $250\mu\text{m}$ 程度と濡れ広がった。また、レーザー援用有りの描画配線の厚みは、約 $10\mu\text{m}$ となり、アスペクト比が0.5となった。

描画した配線幅の誤差としては、 $19.25\mu\text{m}$ から $21.85\mu\text{m}$ 程度であり、目標値である $20\mu\text{m} \pm 10\%$ 以内を達成している。

2-3-2 電極の低抵抗化

Si 基板上の配線の直流抵抗値

図 2-3-2-A に示すように予めパターニングしたシリコン基板上に、レーザー援用インクジェットにより配線幅 $50\mu\text{m}$ の金属電極を17サンプル形成し、4端子法で抵抗率の測定を行った。実験結果を図 2-3-2-B に示す。

図 2-3-2-B の結果、1cm 長さ辺りの配線パターンにおいて、各サンプルの直流抵抗値は、平均 5.48Ω となり、目標値の $6\Omega/\text{cm}$ を達成した。

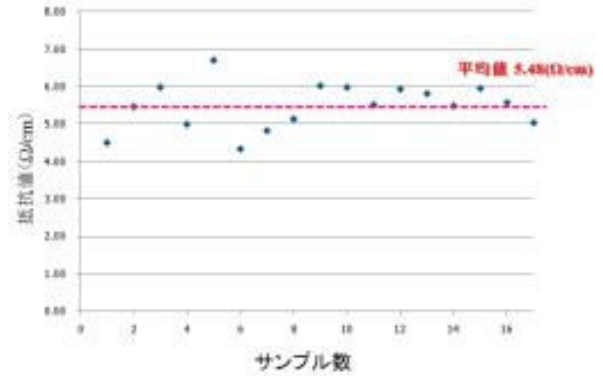
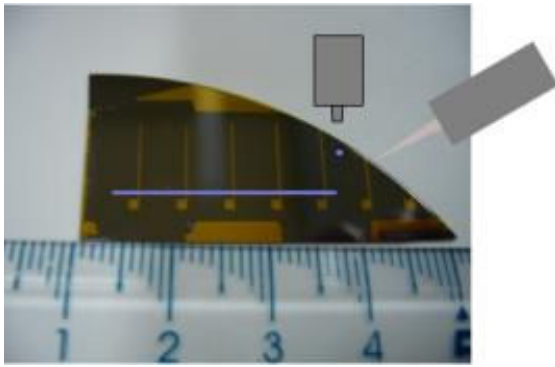


図 2-3-2-A 電極をパターンニングした基板 図 2-3-2-B サンプル 1cm 長さ辺りの直流抵抗値

2-3-3 まとめ

表 2-3-2-a に各開発目標に対する結果と目標達成度をまとめた。

2-3-1 において、金属電極の形成においては、配線幅 1 に関しては、結果として $50 \mu\text{m}$ で合ったが、誤差 $\pm 1\%$ 程度と滑面の配線パターンとなった。配線 2 に関しては、配線幅の誤差は若干大きい目標を達成している。一方、電極形成速度の目標値の $10 \text{mm}/\text{sec}$ に対して、現在 $3 \text{mm}/\text{sec}$ と大きく改善する必要がある。しかし、吐出周波数を著しく向上するインクジェットヘッドがあれば、目標に到達することが可能だと考えている。

2-3-2 では、電極の低抵抗化の目標値 ($6 \Omega/\text{cm}$) に対して、平均 $5.48 \Omega/\text{cm}$ と目標に到達することが出来た。

表 2-3-2-a 各開発目標に対する結果と目標達成度

開発目標		開発結果		目標達成度
金属電極の形成	配線幅1	$55 \mu\text{m} \pm 10\%$ 以内	$55 \mu\text{m} \pm 10\%$ 以内	達成
	配線幅2	$20 \mu\text{m} \pm 10\%$ 以内	$20 \mu\text{m} \pm 10\%$ 以内	達成
	電極形成速度	$10 \text{mm}/\text{sec}$ 以上	$3 \text{mm}/\text{sec}$	未達成
電極の低抵抗化	配線抵抗	$6 \Omega/\text{cm}$ 以下	$5.48 \Omega/\text{cm}$	達成

2-4 接合用無電解めっき皮膜の検討

スパッタ蒸着法に変わる接合用無電解Ni/Auめっき皮膜の開発を行い、また低応力の無電解Niめっき皮膜の検討を行う。

2-4-1 低応力めっき皮膜の開発

パワーデバイスに用いるウエハは薄く、めっき皮膜中の内部応力の影響を受けウエハ反りを生じることもある。そのため、できるだけ内部応力が小さいめっき皮膜の開発が望まれている。

(めっき皮膜の内部応力)

めっき皮膜中には結晶構造の歪みにより皮膜内部に応力が生じる。一般的に、引張応力と圧縮応力がある。引張応力は素材が伸びる方向、圧縮応力は素材が縮む方向にかかる力を指している。

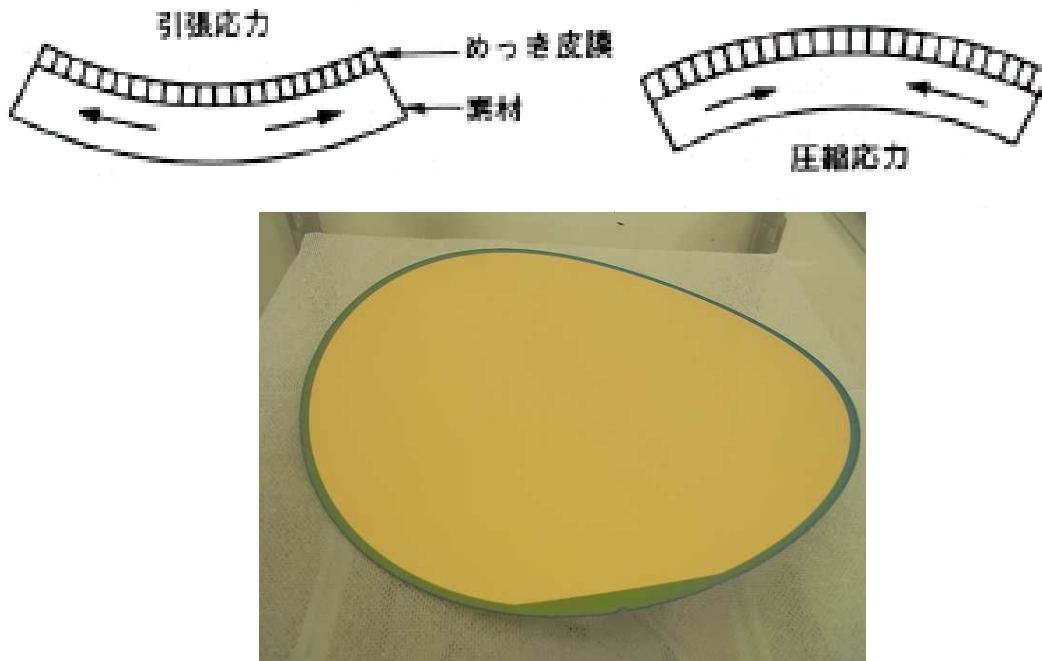


図 2-4-1-A 無電解めっき 引張応力によるウエハ反り

表 2-4-1-a 応力測定結果

		条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥
開脚度		10.5	6.5	15.0	25.0	5.0	8.5
めっき膜厚	μm	11.2	10.9	9.8	10.1	11.5	10.9
応力	※	2.24	1.42	3.66	5.93	1.04	1.93
向き		圧縮	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮	引張

※ Kg/mm²

無電解Niめっきでは、還元剤に含まれるリン成分がめっき皮膜中に取り込まれる。めっき皮膜中に含まれるリン含有量が3wt%以下のものは低リンタイプ、4～8wt%のものは中リンタイプ、10wt%以上のものは高リンタイプに分類され、使用目的により使い分けられている。半田接合を目的に使用する場合は、半田との合金層を作りやすい中リンタイプが用いられることが多く、本研究でも中リンタイプを中心に検討を行った。

検討の結果、錯化剤比率等めっき液組成が応力に影響を与えていることが考えられる。自家建浴液では全ての組成において、目標とする 5.0Kg f/mm^2 を満たす値となっている。今後は、皮膜中の結晶構造解析を行い、めっき液組成が皮膜結晶構造にどのような影響を与えているのか検証を行う必要がある。

2-4-2 電極半田濡れ 信頼性評価

2-4-1で検討しためっき液条件②の液を用いて、シリコンウエハ上に作製した $\phi 300\mu\text{m}$ のテストパターン上へ無電解Ni/Auめっき処理を行った。また、半田接合性の信頼性を確認するため、 $\phi 300\mu\text{m}$ 半田ボールを用い各種試験を行った。

(テストパターンサンプル)

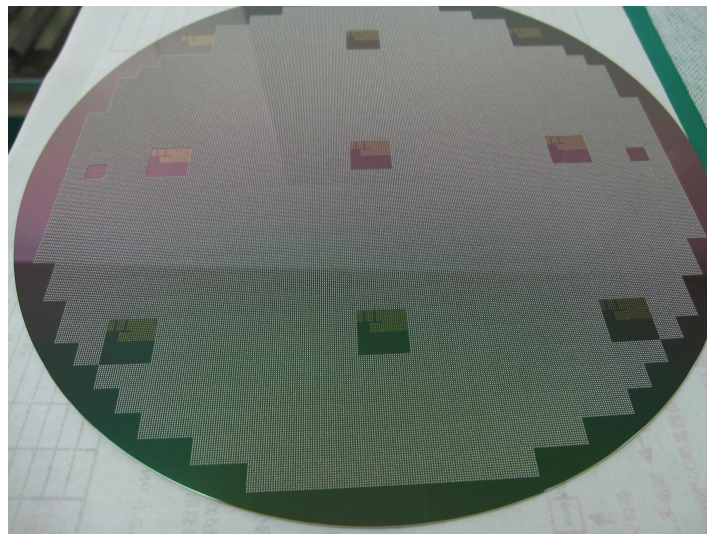


図 2-4-2-A $\phi 300\mu\text{m}$ 評価パターンサンプル

(搭載結果)

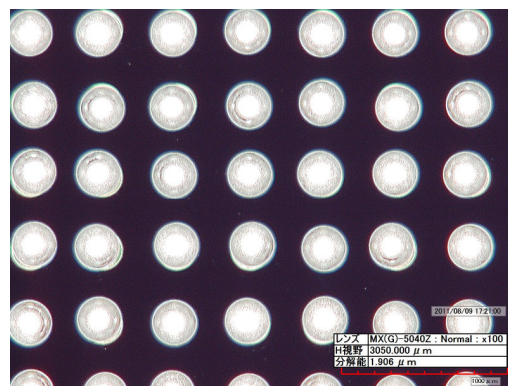


図 2-4-2-B $\phi 300\mu\text{m}$ 半田ボール搭載状態

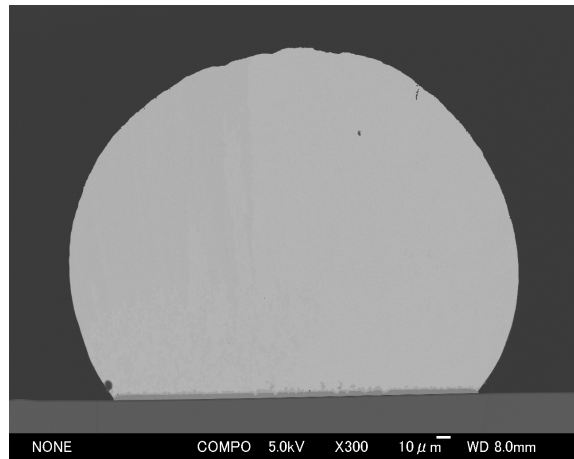
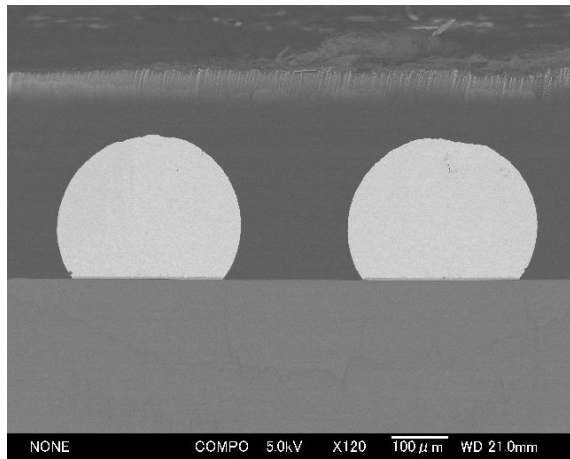


図 2-4-2-C 半田実装断面

(半田耐熱試験)

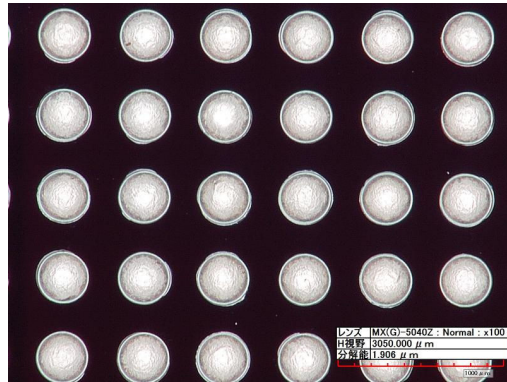
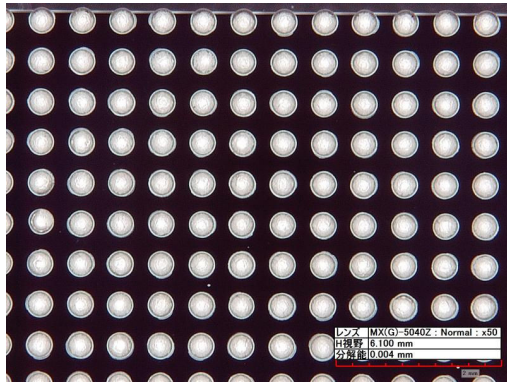


図 2-4-2-D 半田耐熱試験後 外観

(半田濡れ試験)

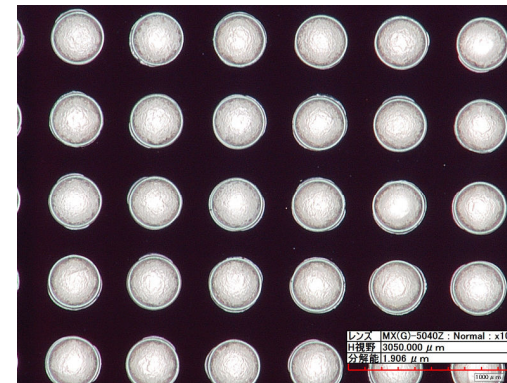
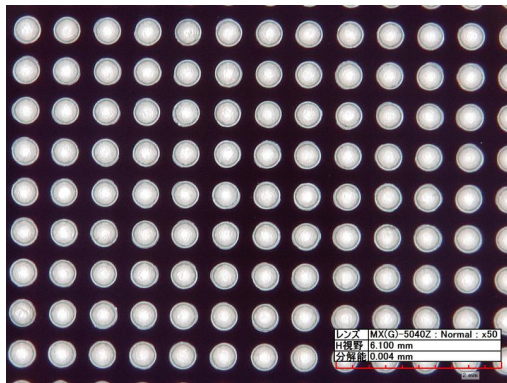
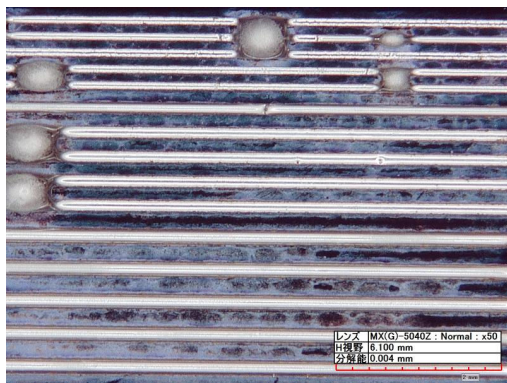


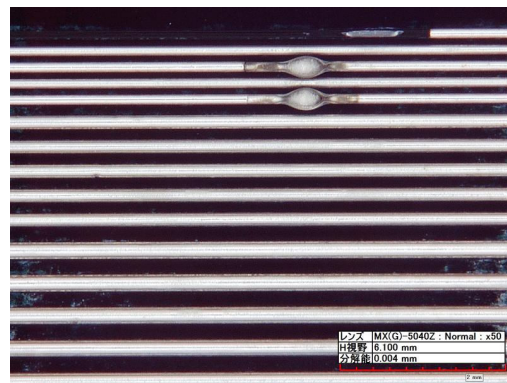
図 2-4-2-E 半田濡れ試験後 外観検査

半田耐熱試験及び半田濡れ試験において、半田実装面に不具合は確認されていないことより、今回検討した接合用無電解めっき皮膜は、半田接合性に適しためっき皮膜であると考えられる。

(フラックス除去)



フラックス除去前



フラックス除去後

図 2-4-2-F フラックス除去前後 外観写真

高出力超音波洗浄機を用いてフラックスを除去した結果、キャビテーションによるウエハ割れが生じることなく、フラックス成分を除去できることが確認されている。

第3章 全体総括

パワーデバイス電極材料は、真空プロセスによるスパッタ蒸着法を用いて作製している。次世代電極材料として、湿式めっき技術、フッ素ガスによる表面改質技術、インクジェット技術を用いて、従来技術と同等の品質を維持したまま短時間、低コストで形成可能な技術開発を行った。

湿式めっき技術では、精密電鍍技術を用いて狙い通りの開口径を有したプリンタヘッドノズル部を作製した。また、金属ナノインクによる磨耗を防ぐため電鍍表面にビッカース硬度Hv2000以上の高硬度膜を形成し、銀ナノ粒子を用いた耐久試験において磨耗の影響を受けないことが確認されている。今後は、今回開発したノズルを用いて、高機能プリンタヘッドを開発することを目指す必要がある。

湿式めっきでは、接合を目的とした低応力無電解ニッケルめっき皮膜を開発した。今後のパワーデバイス素子は高耐電圧化が求められるため、素子冷却機能を強化するため従来の点接点であるボンディング法より面接点である半田接合法に移ることが予想されており、今回開発した無電解めっき技術を半導体業界へ広げることが目標に信頼性評価を行い、実績を積み重ねていく。

フッ素ガスによる表面改質技術では、シリコン表面の濡れ性に変化を与えることが確認され、湿式めっき技術及びインクジェット技術とのコラボレーションにおいて大きな期待が持てる結果が得られえおり、フッ素化によりシリコン表面の特性がどのように変化したのか、金属電極やめっき皮膜にどのような影響を与えているのか明らかにしていく必要があると考えられるため、引き続き検討を行う。

インクジェット技術では、レーザー援用を行うことにより金属ナノインク吐出、着弾時の液拡がりが抑制されることにより吐出金属より微細な金属配線を実現し、高精度配線技術を確立している。今後の目標として、目標値に達することが困難であった吐出速度を改善することにより高スループット化を目指す必要がある。また、複雑な二次元パターンに対応するため、インクジェットヘッドの安定性、ステージ制御、レーザー照射制御を一元的に管理できるシステムの開発を行うことを目標に引き続き検討を行う。

今回得られた技術を用いて、日本が優位を保っているパワーデバイス分野において国際競争性をより強化するため、家電業界や自動車業界に積極的に営業活動を行い、3年以内の量産化を目標とする。家電業界や自動車業界におけるパワーデバイス素子においても、使用されるパワーデバイス素子が増加するに従い、企業間での価格競争が激化しており低コスト化が見込まれる本技術が受け入れられると考えている。